

EWECs 柱脚の構造性能に及ぼす埋込み深さ比および集成材の分割方法の影響

合成構造	静的載荷実験	履歴特性	1220056	神原 広輝*1
応力分布	終局耐力		指導教員	鈴木 卓

1. はじめに

近年の環境負荷の低い建設技術の要求や国産木材の安定供給・流通の促進および有効活用が切望される状況にある。EWECs (Engineering Wood Encased Concrete-Steel) 構造は内蔵鉄骨、コンクリートおよび外殻集成材から構成される合成構造システムである。本構造システムは、集成材の内側に不燃材である鉄骨・コンクリートを使用することで耐火性能の向上が図られており、高層建築物に適用できる。また、従来のSRC構造に比べて鉄筋の省略および型枠兼用の集成材を用いることで施工の簡略化に伴う工期短縮およびコスト削減が期待できる。

既往の実験研究より、本構造では大変形時に集成材全体にひび割れの発生が確認されている²⁾。集成材全体のひび割れはコンクリートの拘束効果の低減および景観性の悪化に繋がることから改善の余地がある。一方で、本研究対象であるEWECs埋込み柱脚の終局耐力評価の検証はこれまでに終わっておらず、評価精度は不明瞭である。

そこで本研究では、外殻集成材の分割および埋込み深さ比を変数としたEWECs柱脚の破壊性状、履歴特性について検討するとともに鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説³⁾ (以下SRC規準と呼称する) を基にした終局耐力評価法の適用性の検討結果も併せて述べる。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は実物大の約1/3スケールのも3体である。図1に試験体形状を、表1に試験体概要を示す。試験体寸法は、柱コンクリート断面 $b \times c \times D$ が300mm角、内蔵鉄骨は、RH-250×125×6×9mmである。柱脚から加力高さまでは950mm (せん断スパン比 $M/Q_c D = 2.5$) である。ベースプレートは、PL-12である。アンカーボルトにナットを取り付けその上にベースプレートを設置した。集成材の樹種にはカラマツを使用し、厚さは40mmとした。集成材の二次接着はウレタン系接着剤を使用した。スタブと集成材の間には10mmの隙間を設けた。スタブには、鉄筋コンクリート基礎を模擬した主筋およびせん断補強筋を配し、埋込み部周辺には縦筋および横筋をそれぞれ配した。表2にコンクリート、表3に集成材および表4に鋼材の材料特性をそれぞれ示す。

試験体変数は内蔵鉄骨の埋込み深さ比 (埋込み深さを鉄骨せいで除した値) および集成材の分割である。試験

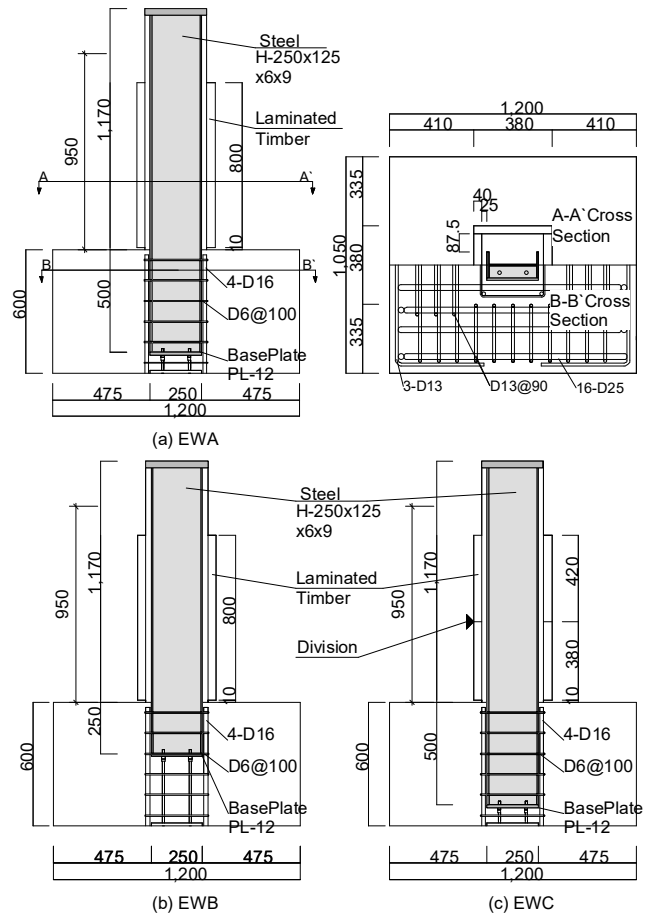


図1 試験体形状

表1 試験体概要

試験体		EWA	EWB	EWC
実験変数	埋込み深さ比	2.0	1.0	2.0
	集成材分割	なし	なし	あり
柱	断面 $b \times c \times D$	300×300		
	せん断スパン比	2.5		
	鉄骨断面	RH-250×125×6×9		
	集成材厚 (mm)	40		
	ベースプレート	PL-12×250×125		
柱脚	縦筋	4-D13		
	横筋	2-D6@100		
軸力比		0.2(導入軸力 650kN)		

体EWAを基準 (鉄骨埋込み深さ比2.0) とし、試験体EWBは鉄骨埋込み深さ比を1.0とし、試験体EWCは集成材を分割したものとした。第4章で後述する終局耐力計算の結果、試験体EWAおよびEWCは柱曲げ降伏先行型に試験体EWBを柱脚支圧破壊先行型となるように計画した。

2.2 載荷方法

図2に載荷装置を示す。鉛直オイルジャッキによって軸

表2 コンクリートの材料特性

	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
柱コンクリート	28.8	19.9	2.57
スタブ コンクリート	EWA	25.1	20.7
	EWB	24.9	21.0
	EWC	28.3	19.6

表3 集成材の材料特性

	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
カラマツ	43.7	11.2

表4 鋼材の材料特性

		降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
鉄骨 (SS400)	ウェブ	357	195	458
	フランジ	312	184	443
	ベースプレート	278	193	466
鉄筋 (SD295)	横筋 D6	374	190	579
	縦筋 D13	334	199	497

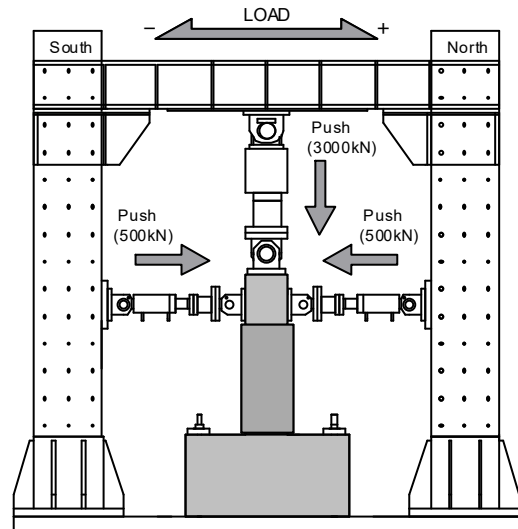


図2 荷装置

Observed: △ Maximum capacity, Yielding of steel flange: □ Tension, ○ Compression, Ultimate strength: - - - Column — Base

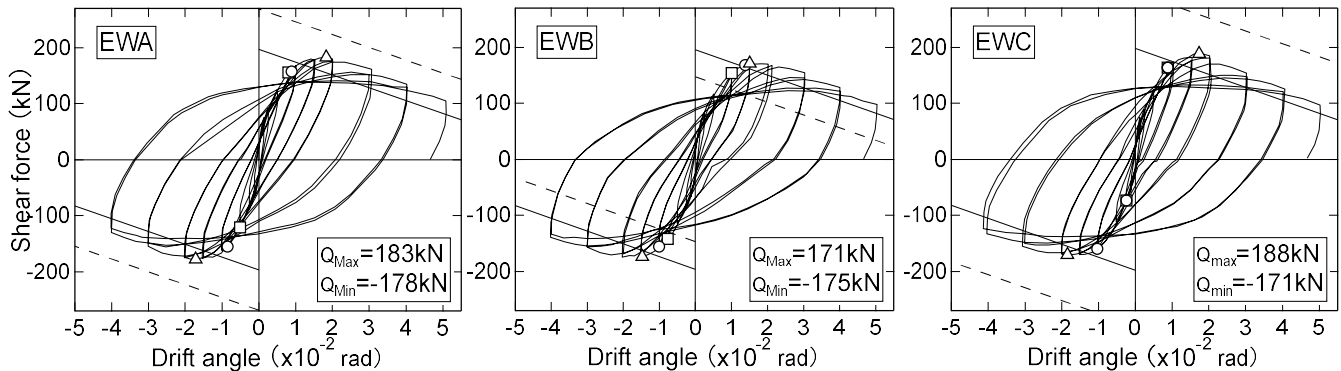


図3 せん断力-変形角関係

力比 (N/N_0 , N_0 : 柱の軸圧縮耐力で SRC 規準³⁾に準じて式(1)および式(2)より算出) 0.2 に相当する一定軸力 N を作用させつつ、水平オイルジャッキによって水平力を作用させた。水平力荷重は加力点の水平変位 δ を柱から加力点までの高さ h で除した変形角 $R (= \delta/h)$ による変位制御とした。

$$N_0 = c r_u \sigma_B c A + s \sigma_y s A \quad (1)$$

$$c r_u = 0.85 - 2.5 s p_c \quad (2)$$

ここで、 σ_B : コンクリートの圧縮強度、 cA : コンクリートの断面積、 $s\sigma_y$: 鉄骨の降伏強度、 sA : 鉄骨の断面積、 $s p_c$: 圧縮側鉄骨比である。

3. 実験結果

3.1 破壊性状および履歴特性

図3に各試験体のせん断力-変形角関係を示す。同図には、実験における鉄骨フランジの圧縮降伏点、引張降伏点、最大耐力点および第4章で示す柱の終局耐力と柱脚の終局耐力計算の計算結果を併せて示した。写真1に各試験体の実験終了後の集成材の損傷状況を示す。

全試験体ともに $1.0 \times 10^{-2} \text{rad}$ までに柱およびスタブの境界付近のコンクリートに曲げひび割れ、集成材にひび割れの発生がそれぞれ確認された。また、 $1.0 \times 10^{-2} \text{rad}$ の荷重サイクルにおいて鉄骨フランジの降伏に伴う剛性低下が、 $2.0 \times 10^{-2} \text{rad}$ の荷重サイクルにおいて最大耐力が確認された。

埋込み深さ比2.0の試験体EWAおよびEWCでは、 $4.0 \times 10^{-2} \text{rad}$ の荷重サイクルにおいて集成材およびスタブの接触に伴い側面と正面集成材のひび割れの拡幅が確認された。一方の埋込み深さ比1.0の試験体EWBでは、 $5.0 \times 10^{-2} \text{rad}$ の荷重サイクルにおいて集成材およびスタブの接触に伴い側面集成材下部のひび割れの拡幅が確認された。同試験体は試験体EWAおよびEWCに比べて柱脚部にわずかに損傷がみられた。以上の結果から全試験体の破壊形式は柱曲げ降伏先行型と判断される。

図4に全試験体のせん断力-変形角関係の包絡線の比較を示す。同図には実験における最大耐力を併せて示した。試験体EWBの最大耐力および最大耐力までの剛性は試験体EWAおよびEWCのものに比べて低く、鉄骨埋め込み深さ比の影響が伺える。

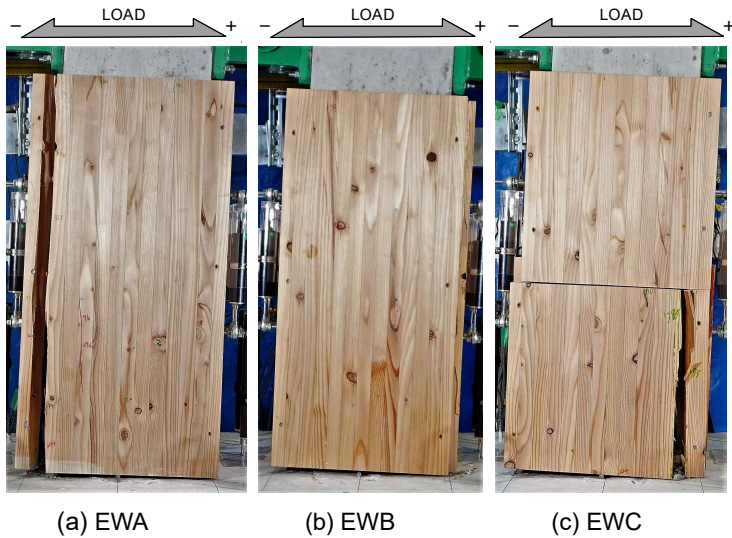


写真 1 最終破壊状況（試験体正面）

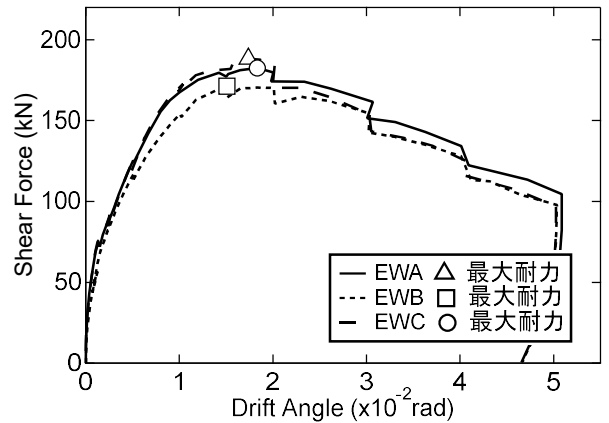


図 4 せん断力-変形角関係の包絡線

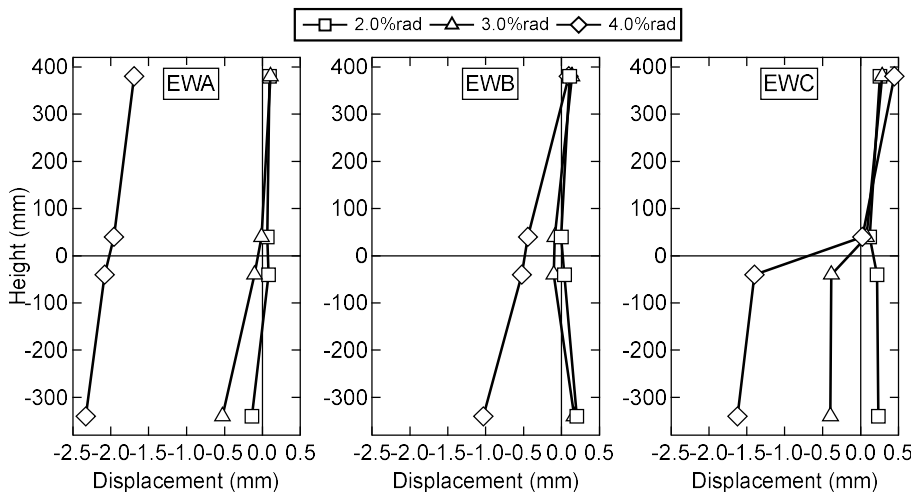


図 5 集成材拡幅の高さ方向分布

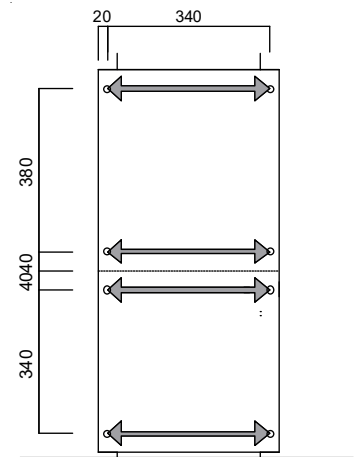


図 6 変位計取り付け位置

3.2 集成材の拡幅

図5に各試験体裏面の集成材に取り付けた変位計の計測値を、図6に変位計取り付け位置をそれぞれ示す。図5は変形角が2.0, 3.0, 4.0 $\times 10^{-2}$ radの正載荷1サイクル目ピーク時の値である。

全ての試験体で2.0 $\times 10^{-2}$ radの載荷サイクルまでは変位の大きな増加は認められない。試験体EWAおよびEWCでは3.0 $\times 10^{-2}$ radにおいて集成材下部に変位が現れ、4.0 $\times 10^{-2}$ radにおいて変位の顕著な増加が確認された。これは3.1節で示した集成材ひび割れの拡幅により生じたたわみが現れたものと推察される。試験体EWBでは3.0 $\times 10^{-2}$ radまで変位の大きな増加は認められず、4.0 $\times 10^{-2}$ radにおいて変位の増加が確認された。試験体EWBでは5.0 $\times 10^{-2}$ radにおいてひび割れの拡幅が起きたためと考えられる。

試験体EWAでは集成材全体にわたり変位の増加が確認されたが、試験体EWBでは集成材上部ほど変位が小さい。試験体EWCでは上部の集成材における変位計の顕著な変位は確認されず、下部に変位が集中しており、集成材を

分割した影響が伺える。

3.3 鉄骨フランジの応力分布

図7に各試験体の引張側の鉄骨フランジの高さ方向応力分布を、図8にひずみゲージ取り付け位置を示す。図7は変形角が1.0, 1.5 $\times 10^{-2}$ radの正載荷1サイクル目ピーク時の値である。鋼材の応力は履歴特性をバイリニア型と仮定し、ひずみゲージの計測値から算出した。

全試験体ともにスタブ境界面付近において高い応力の発生が確認された。併せてスタブ境界面で応力分布の傾きが逆になっている。1.0 $\times 10^{-2}$ radでは、試験体EWBおよびEWCはスタブ境界面付近の応力が最大となり、試験体EWAでは境界面付近に比べて上の位置の応力が最大となる。なお、鉄骨埋込み深さ比に拘わらず、柱鉄骨上部および下部では応力が低い傾向が確認された。

4. 終局耐力計算

EWECs柱の曲げ終局強度は一般化累加強度理論を用いて算出した。

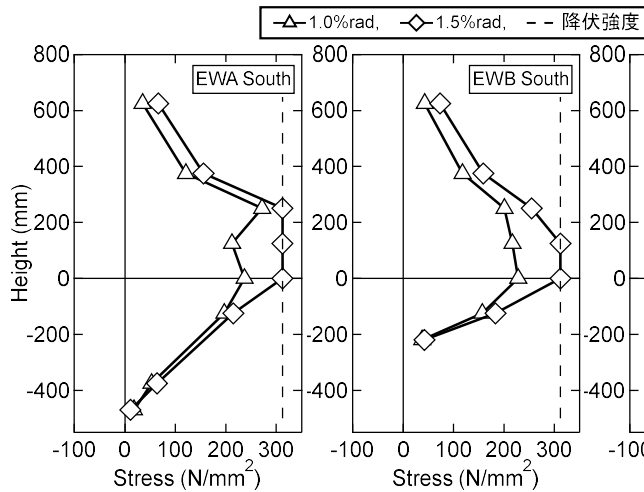
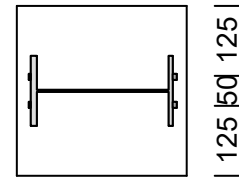


図7 鉄骨フランジの高さ方向応力分布



柱断面

図8 ひずみゲージ取り付け位置

表5 耐力計算と実験結果の比較

試験体		EWA	EWB	EWC
実験値 (kN)		183	175	188
柱曲げ耐力(kN)		154	151	154
柱脚支圧耐力 (kN)		226	102	255
実験値 / 計算値	柱曲げ	1.19	1.16	1.22
	柱脚支圧	0.81	1.72	0.74

埋込み部コンクリートの支圧破壊時の柱脚曲げモーメント（柱脚支圧耐力と呼称する）は、SRC規準³⁾を基に式(3)から式(6)に従い算出した。ここで、同式中の cM_{bu} は柱コンクリートの曲げ耐力、 sM_{bu1} はベースプレート下面の終局曲げ耐力である。なお、ベースプレート下面に作用する軸力は柱鉄骨の曲げ耐力時の値である。

$$M_{bu} = cM_{bu} + sM_{bu} + sM_{bu} \quad (3)$$

$$sM_{bu} = -\frac{sQ_u b h}{2} + \frac{b_e F_B}{4} \left\{ b h^2 - \left(\frac{sQ_u}{b_e F_B} \right)^2 \right\} \quad (4)$$

$$b_e = s t_w + 2 s d_f \quad (5)$$

$$F_B = \min\left(\sqrt{c b / b_e} F_c, 12 F_c\right) \quad (6)$$

ここで、 sM_{bu2} ：埋込み部支圧破壊時の鉄骨の終局強度、 sQ_u ：柱鉄骨の曲げ耐力時せん断力で一般化強度理論による計算値、 $s d_f$ ：鉄骨フランジ表面からウェブフィレット先端までの距離である。

表5に実験によって得られた最大耐力と終局耐力計算値を示す。

実験の最大耐力および柱曲げ耐力計算値との比率は、約1.2程度であり、本論に示す埋込み柱脚の最大耐力は一般化累加強度理論によって概ね精度良く評価可能である。鉄骨埋込み深さ比2.0の試験体EWAおよびEWCでは、柱曲げ耐力の計算値が柱脚支圧耐力の計算値と比べて低く、耐力評価に基づく破壊形式は実験結果と同様に柱曲げ降伏先行型と判断された。一方で、鉄骨埋込み深さ比1.0の試験体EWBでは、SRC規準³⁾に基づく柱脚支圧耐力の計算値が柱曲げ耐力の計算値に比べて低く、終局耐力評価に基づく破壊形式は柱脚支圧破壊先行型となり、実験結果の柱曲げ破壊先行型と対応していない。柱脚支圧耐力の評価精度の検証は今後の検討課題と考える。

5. まとめ

本研究では、集成材の分割および埋込み深さ比を変数としたEWECs柱脚の静的載荷実験を行った。本論で得られた知見を以下に示す。

- 1) 本論に示すEWECs柱脚では、鉄骨埋込み深さ比の差異に拘わらず柱脚部に顕著な損傷は認められず、柱曲げ降伏先行型の破壊形式を示す傾向が確認された。
- 2) 鉄骨埋込み深さ比1.0の試験体の最大耐力および最大耐力までの剛性は鉄骨埋込み深さ比2.0の試験体に比べて低くなる傾向が認められた。
- 3) 集成材を分割した試験体における集成材のひび割れは下部に集中する傾向が確認された。
- 4) 鉄骨埋込み深さ比に拘わらず、ベースプレート付近では鉄骨フランジに生じる応力は低い。
- 5) EWECs柱脚の柱の耐力は一般化累加強度理論によって概ね評価可能であった。一方で、SRC規準に示される埋込み柱脚の柱脚支圧耐力は鉄骨埋込み深さ比1.0の試験体の最大耐力と比べて低く、終局耐力評価によるEWECs埋込み柱脚の破壊形式の判定法については今後の課題である。

参考文献

- 1) 田口孝, 神谷隆, 芳賀裕司, 鈴木卓, 新藤健太, 上川大輔, 玉置教司: EWECs柱の耐火性能, 日本建築学会技術報告集, Vol.24, No.56, pp.211-216, 2018.2
- 2) 瀧野敦夫, 熊谷将吾, 新藤健太, 倉本洋: 変動軸力および高軸力を受けるEWECs柱の構造性能, 日本建築学会技術報告集, Vol.77, No.672, pp.309-314, 2012.2
- 3) 日本建築学会: 鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2014.1